

文章编号:1673-9469(2023)03-0009-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.03.002

预制键槽 UHPC-混凝土界面黏结性能研究

赵明海¹,周建国²,田砾¹,李春雨³,王鹏刚^{1*}

(1. 青岛理工大学 土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东路桥青岛分公司, 山东 青岛 266000;
3. 胶州市交通运输局, 山东 青岛 266300)

摘要: UHPC 永久性模板与普通混凝土的界面黏结性能是两者协同作用的关键, 研究不同键槽类型、混凝土强度和养护条件等因素对 UHPC-混凝土界面黏结性能的影响。结果表明: 键槽可以提高 UHPC-NC 界面黏结强度, 其中 B 型键槽机械连锁作用贡献最大。劈裂拉伸试件界面中心轴线的应变大于两侧应变, 界面裂缝从水平拉应变开始向压应变区域扩张。复合试件键槽的存在使得裂缝在混凝土内部由一端延伸至另一端, 并非两端向内发展。随着后浇混凝土抗压强度的提高, 界面劈裂抗拉强度增幅降低。蒸汽养护导致初始收缩变形较大, 应力集中区域比标准养护试件更大。复合试件界面劈裂抗拉强度可以通过混凝土立方体抗压强度和拟合参数 c 计算得出。提出了最优永久性模板键槽参数和养护条件。

关键词: 永久性模板; 超高性能混凝土; 劈裂拉伸试验; 界面抗拉; 数字散斑技术

中图分类号: TU528.1

文献标识码: A

Study on Bonding Performance of the Interface Between Precast Keyway UHPC and Post-cast Normal Concrete

ZHAO Minghai¹, ZHOU Jianguo², TIAN Li¹, LI Chunyu³, WANG Penggang^{1*}

(1. Department of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;
2. Shandong Road and Bridge Group Co. Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China;
3. Jiaozhou Transportation Bureau, Qingdao, Shandong 266300, China)

Abstract: The interfacial bonding performance between ultra-high performance concrete (UHPC) permanent template and ordinary concrete (NC) is the key to their synergistic effect. The effects of different keyway types, concrete strength, and curing conditions on the interfacial bonding performance of UHPC-NC were studied. The results indicate that keyway can improve the bonding strength of UHPC-NC interface, with B-type keyway mechanical interlocking contributing the most. The strain of the central axis of the interface of the splitting tensile specimen is greater than that of the two sides, and the interface crack expands from the horizontal tensile strain to the compressive strain region. The existence of keyways in composite specimens causes cracks to extend from one end to the other inside the concrete, rather than developing inward from both ends. As the compressive strength of post poured concrete increases, the increase rate of the interfacial splitting tensile strength decreases. Steam curing specimens result in a larger initial shrinkage deformation and a larger stress concentration area than standard curing specimens. The interfacial splitting tensile strength of composite specimens can be calculated from the compressive strength of concrete cubes and the fitting parameter c . The optimal permanent template keyway parameters and maintenance conditions are proposed.

Key words: permanent template; UHPC; splitting tensile test; interfacial tension; digital speckle correlation method

收稿日期: 2023-03-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(5227082433); 山东省自然科学基金面上项目(ZR202103020358); 宁波市科技创新 2025 重大专项(2020Z035)

作者简介: 赵明海(1998-), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 从事 UHPC 方面的研究。

* 通讯作者: 王鹏刚(1982-), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 从事混凝土结构耐久性方面的研究。

预制永久性模板具有施工方便、现场施工时间短等优点,在满足新型结构的耐久性要求和模板技术发展要求的同时,成为传统模板体系极具吸引力的替代方案。而超高性能混凝土(Ultra-High Performance Concrete, UHPC)-后浇混凝土(Normal Concrete, NC)的界面黏结性能是其协同工作的基础,许多学者对其进行了研究^[1-4]。Feng等^[5]研究表明直接拉伸试验无法准确反映粗糙度参数对黏结性能的影响。Tayeh等^[6]通过定量研究不同粗糙度基体表面UHPC-NC的黏结能力,发现在界面龄期不超过28天时劈拉强度显著增加。Ganesh等^[7]评价了不同表面处理(开槽和钻孔)方式的NC基底与UHPC覆盖层间界面黏结性能,其中开槽试件强度最高。Al-Osta等^[8]研究表明劈拉试验比三点弯曲试验更适于评估不同养护条件下的界面黏结强度。Beushausen等^[9]研究表明,基体混凝土的水分饱和并不会积极地影响黏结强度;在标准养护条件下,基体表面的黏结强度反而显著降低。Huang等^[10]通过试验得出较高的养护温度对新旧混凝土的黏结拉性能有很大影响。总结得出,界面粗糙度、NC强度和养护条件对UHPC-NC复合试件界面抗拉强度有显著影响^[11-13]。ASTM C496最初用于获得整体混凝土试样的抗拉强度,但也适用于计算不同混凝土的界面抗拉强度^[14]。Hussein等^[15-16]研究了不同界面粗糙度下UHPC-NC界面的摩擦和黏附作用,得到黏结界面的劈拉强度和摩擦系数 μ 。以上学者重点研究了NC基底-UHPC覆盖层之间的界面黏结性能,而对预制UHPC-后浇NC的黏结性能研究尚少见报道。针对这一问题,本文研究了不同键槽类型、后浇NC强度和养护条件对预制UHPC永久性模板-后浇NC界面拉伸性能的影响,并运用DIC分析界面应变场,了解试验中界面开裂过程,

以评价UHPC-NC界面的黏结性能。

1 试验方案

1.1 UHPC与混凝土配合比

UHPC配合比如表1所示,采用符合《超高性能混凝土技术要求》(T/CECS 10107—2020)的原材料:P·II 52.5硅酸盐水泥;粒径小于1 mm石英砂;长度13 mm,直径0.2 mm的长直镀铜钢纤维^[17];减水率为30%的聚羧酸高效减水剂。首先,将水泥、硅灰、粉煤灰加入强制性搅拌机,干拌2 min;然后加入石英砂,干拌2 min;再加入水与减水剂,搅拌4 min;加一半钢纤维,搅拌4 min;加入另一半钢纤维,搅拌4 min。UHPC在60℃蒸养箱中养护48 h后的28 d抗压强度为143.7 MPa,弹性模量为41.2 GPa。

混凝土配合比如表2所示。采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;河砂粒径小于5 mm;大石粒径为10~20 mm玄武岩;小石粒径为5~10 mm玄武岩。

1.2 劈裂拉伸试件设计与制备

预制UHPC永久性模板键槽类型与参数如图1所示。A、B型模板的键槽密度为0.04,槽间距分别为30 mm和20 mm,C型模板的键槽密度和键槽间距分别为0.036和16 mm。键槽密度 ρ 计算公式如式(1)所示:

$$\rho = \frac{n\omega\Delta d}{ab} \quad (1)$$

式中: n —黏结面的槽数; ω —槽的宽度,mm; a —黏结面的长度,mm,代表切槽方向; b —黏结面的宽度,mm; Δd —槽深,mm(黏结面混凝土最大粗骨料粒径的 $1/4 \sim 1/2$);本文采用的石子 $D_{\max} = 20$ mm,所以 $\Delta d = 5 \sim 10$ mm,槽深 Δd 取10 mm。

表1 UHPC配合比和材料性能

Tab.1 Mix proportion and mechanical property of UHPC

水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	硅灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	石英砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	钢纤维/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 抗压 强度/MPa	弹性模量/ GPa
680	144	200	1 060	156	30	180	143.7	41.2

表2 普通混凝土配合比和材料性能

Tab.2 Mix proportion and mechanical property of normal concrete

组分	水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	砂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	大石/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	小石/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉煤灰/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	矿粉/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	减水剂/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	28 d 抗压 强度/MPa	弹性模量/ GPa
C30	214	704	879	211	71	71	178	5.7	34.6	30.96
C40	279	645	878	207	79	79	175	7.0	44.6	33.69
C50	325	522	922	221	50	125	170	8.0	53.3	35.76

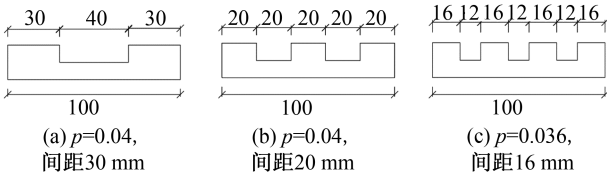


图 1 永久性模板键槽参数(单位:mm)

Fig. 1 Keyway parameters of UHPC permanent template (unit: mm)

考虑键槽类型、NC 强度和养护条件等因素,设计了 3 组对比试验和 10 组复合试件,如表 3 所示。“U”表示先浇筑的 UHPC 部分,“N3,N4,N5”表示后浇筑的 C30,C40,C50 混凝土,“A,B,C”表示三种不同键槽类型,“Z”表示 60 °C 蒸汽养护 1 d,未标注“Z”的试件采用标准养护。

表 3 劈裂拉伸试件编号

Tab. 3 Numbers of splitting tensile specimen

编号	试件类型	后浇 NC 强度	界面形态	养护时间/d	影响因子
1	T-N3	C30	整体试件	28	
2	T-N4	C40	整体试件	28	
3	T-N5	C50	整体试件	28	
4	T-UN5-A-28	C50	A	28	界面形态
5	T-UN5-B-28	C50	B	28	界面形态
6	T-UN5-C-28	C50	C	28	界面形态
7	T-UN3-B-28	C30	B	28	NC 强度
8	T-UN4-B-28	C40	B	28	NC 强度
9	T-UN5-BZ-28	C50	B	1+27	养护条件

劈裂拉伸复合试件分为 UHPC 和 NC 两部分。浇筑 UHPC 前,立方体模具中放置键槽隔离模具,如图 2 所示。试件制作过程具体如下:(1)先浇筑 UHPC 试件(图 2),表面覆盖薄膜并常温养护 2 d 后脱模;再进行 60 °C 蒸汽养护 2 d,结束后继续标准养护至第 7 d。(2)UHPC 试件重新装入模具,如图 3 所示。(3)正常浇筑 NC 部分,1 d 后脱模,继续标准养护至第 28 d;编号 9 试件脱模后再 60 °C 蒸汽养护 1 d,取出后继续养护至目标时间。

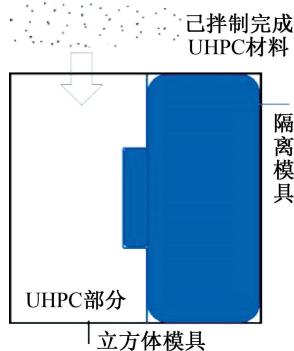


图 2 浇筑 A 型键槽 UHPC 示意图

Fig. 2 UHPC diagram of pouring type A keyway

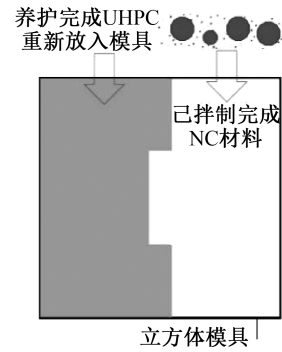
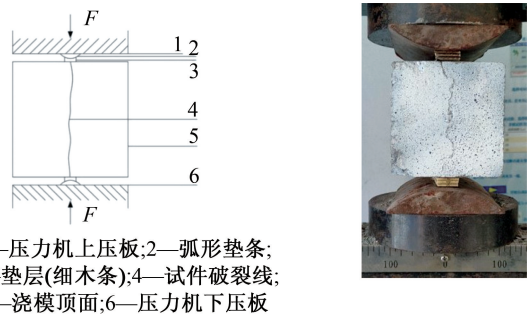


图 3 浇筑 NC 示意图

Fig. 3 Pouring NC diagram

1.3 劈裂拉伸试验方案

劈裂拉伸试验参照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[18],如图 4 所示。采用量程为 1 000 kN 的 SANS 压缩试验机进行加载,加载速率为 0.05 MPa/s。通过数字图像处理技术(DIC)采集。



(a) 试验装置示意图

(b) 加载试验实物图

图 4 劈裂抗拉试验示意图

Fig. 4 Diagram of splitting tensile tests

界面区域的应变场^[19],使用 Point Grey Fly Cap 图像相关软件,以 1 Hz 的频率从连续拍摄的图像中得出数据。

2 结果分析与数据讨论

2.1 劈拉试件破坏模式

T-N3、T-N4 和 T-N5 立方体整体试件破坏形态如图 5 所示,表面混凝土出现不同程度的缺失。初始裂纹通常出现在试件加载中心轴线上,并随着荷载增大裂纹逐渐向试件两端扩展,形成贯通的 I 字形裂缝,直接穿过粗骨料并导致其断裂(图 5 中红色标记)。随着 NC 强度等级的增加,裂缝路径趋于直线,水泥石-骨料咬合机制对界面抗拉强度贡献越大。

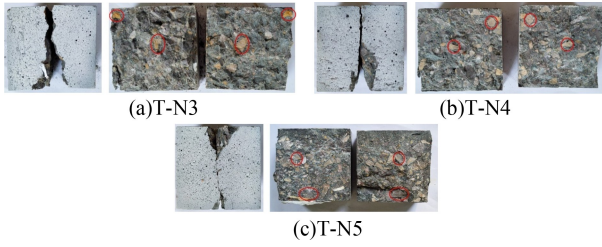


图5 整体试件劈裂拉伸破坏模式:NC强度等级的影响
Fig. 5 Splitting tensile failure pattern of concrete specimens: effect of NC strength

UHPC-NC 劈裂拉伸试件破坏图如图6和图7所示。通过观察断口,复合试件形成与整体试件相似的I字形裂缝,贯通劈裂试件并使其分离成两半。可以观察到嵌入UHPC键槽内部的NC基体,在破坏时残留在键槽内部。图6(a)中约40%的混凝土留在单键槽内,且UHPC部分发生破坏。对比双键槽(键槽宽度为20 mm)和三键槽(键槽宽度为12 mm)试件,可以看出前者键槽界面处存在较多的粗骨料,导致界面劈裂抗拉强度高于后者。

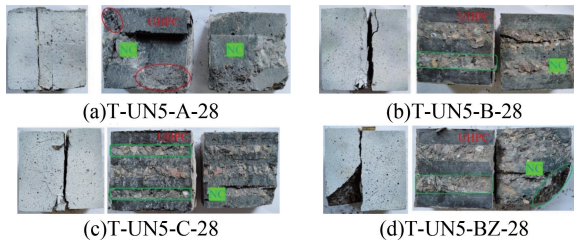


图6 UHPC-NC 劈裂拉伸破坏模式:键槽参数的影响
Fig. 6 Splitting tensile failure pattern of UHPC-NC specimen: effects of keyway parameters



图7 UHPC-NC 劈裂拉伸破坏模式:NC强度的影响
Fig. 7 Splitting tensile failure pattern of UHPC-NC specimen: effects of NC strength

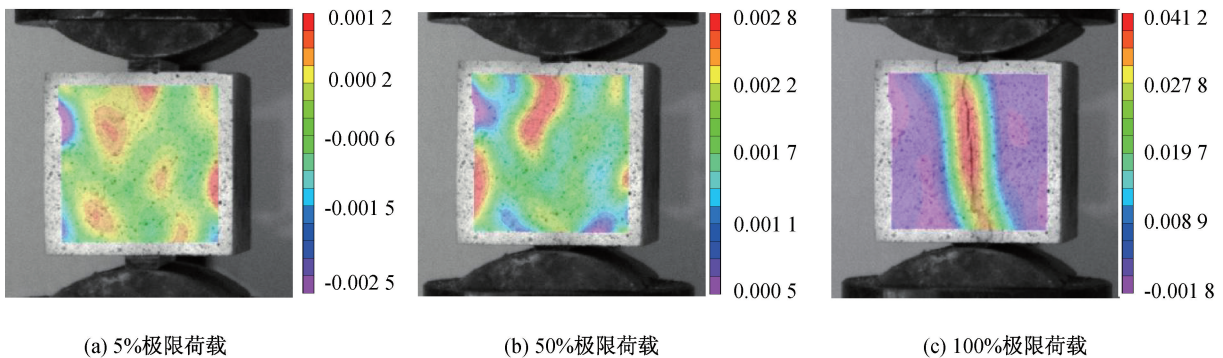


图8 不同极限荷载下 T-N5 试件应变图

Fig. 8 Strain diagram of T-N5 specimen under different ultimate loads

对比图6中的(b)和(d)可以看出,T-UN5-BZ-28试件NC部分出现缺失,这主要是因为蒸汽养护促进了水泥水化,但水化产物较脆,在基体与骨料的过渡区积累了较多的氢氧化钙。蒸养试件表面失水量较多,混凝土内外产生湿度梯度,变形不均匀导致界面应力集中。

对比图6(b)和图7,可以看出随着后浇NC强度提高,次裂纹相对减少,且粗骨料的脱落也较少,键槽与骨料之间的互锁机制也增强了。这是因为低等级混凝土的水灰比高,胶凝材料强度较低,且界面过渡区的宽度较大,容易导致骨料出现脱离现象。

综上所述,键槽可以提高UHPC-NC界面黏结强度,其中机械联锁作用占比较高。机械联锁作用是由预制UHPC与后浇NC在键槽界面上形成的咬合力,它可以增加界面黏结强度^[20]。此外,键槽还可以增加预制UHPC与后浇NC间的接触面积,从而在一定程度上增加化学结合力。黏附理论认为,范德华力是由分子间力相互作用形成的,是界面黏结强度的基础之一。当拉应力增大导致界面开裂时,化学黏结力和范德华力会消失。UHPC-NC试件的劈裂抗拉强度与NC基体的强度密切相关。

2.2 劈拉试件应变分布

DIC分析的基本原理是匹配试样表面散斑,通过计算获得试样表面散斑的运动轨迹,可以大范围获取任意时刻的整体应变场。由图8可见,50%极限荷载下的T-N5试件受压区域变小,受拉区域变大,界面处应变集中现象更为明显;100%极限荷载下,加载中心轴线处出现一条竖长受拉区域,表明界面中心轴线的应变大于两侧的应变。DIC捕捉到的界面裂缝张开度突然增大,界面裂缝是从水平拉应变开始向压应变区域扩张的。

不同键槽参数对 UHPC-NC 劈裂拉伸试件水平应变演化的影响如图 9 所示。可以观察到,加载前期试件受压区域逐渐扩展,随着荷载增加,试件内部出现受拉应变并形成应变集中区域。100% 荷载时应变集中区域迅速扩展,试件内部出现了失稳现象。试件失效时,上下中心面偏离一定距离的位置均出现了由外向内的应变集中区域,这些区域在失效时演化为宏观裂缝。与整体试件不同,复合试件裂缝并未从两端向内发展,而是由一端延伸至另一端。这可能与键槽的存在有一定的关系。

图 10 为 UN5-BZ-28 劈裂拉伸试件水平向应变云图。与 UN5-B-28 相比,该试件的应力集中区域范围更大。这是由于蒸汽养护促进了水泥水化,提高了混凝土基体的水化程度,从而促进其形成紧密的结构。但由于初始收缩变形较大,应力集中区域比标准养护试件更大。

2.3 劈裂抗拉强度计算

劈裂抗拉强度按式(2)计算,其计算平均值、标准差和变异系数如表 4 所示:

$$f_{ts} = \frac{2F}{\pi A} = 0.637 \frac{F}{A} \quad (2)$$

式中: f_{ts} —混凝土劈裂抗拉黏结强度(MPa),计算结果应精确 0.01 MPa; F —劈裂拉伸试验的极限荷载(kN); A —试件劈裂黏结面面积(mm^2)。浇筑试件为 100 mm 立方体试件,劈裂抗拉强度应乘以折减系数 0.85。

根据表 4 可以看出,整体试件的劈拉强度约为立方体抗压强度的 1/10,其标准差和变异系数在可取范围内。T-N3 和 T-N4 试件劈拉强度普遍低于同等级复合试件,因为 UHPC 中的钢纤维与混凝土能够使得基体的拉应力重新分布^[21],从而有效提高界面黏结抗拉强度。但 T-N5 试件则恰恰

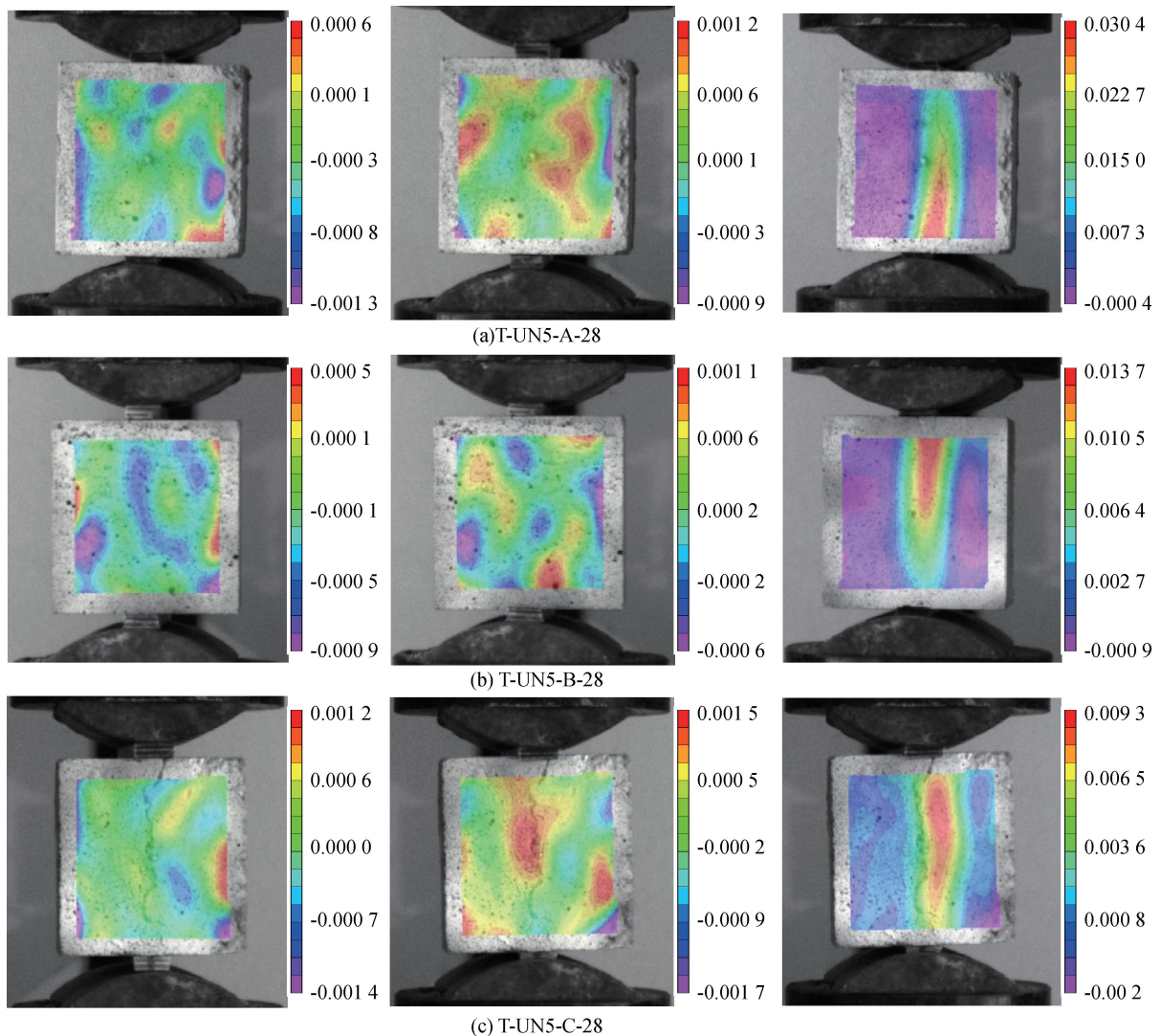


图 9 UHPC-NC 劈裂拉伸试件水平向应变云图:键槽参数的影响

Fig. 9 Horizontal strain diagram of UHPC-NC splitting tensile specimen: effect of keyway parameters

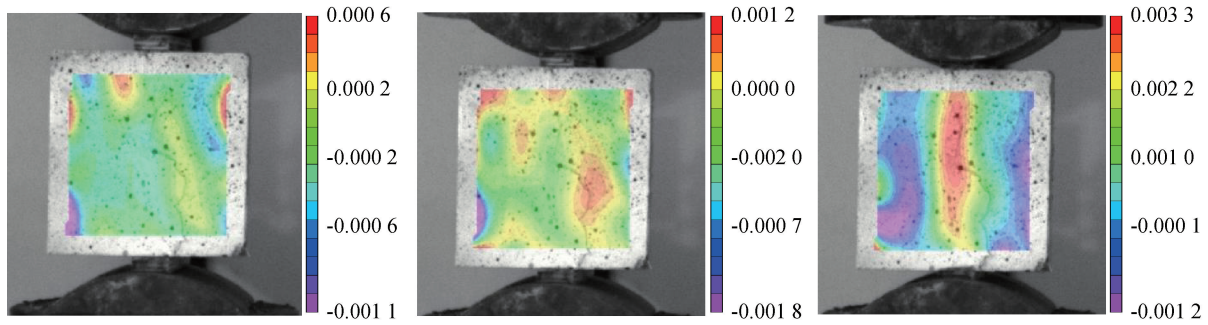


图 10 UN5-BZ-28 劈裂拉伸试件水平向应变云图

Fig. 10 Horizontal strain diagram of UN5-BZ-28 splitting tensile specimen

表 4 劈裂抗拉强度计算值

Tab. 4 Calculated values of splitting tensile strength

试件类型	试件破坏极限荷载 F/kN			劈裂抗拉强度 f_{ts}/MPa			平均值	标准差/ MPa	变异 系数/%
	1	2	3	1	2	3			
T-N3	61.085	65.934	67.971	3.307	3.570	3.681	3.519	0.157	4.252
T-N4	76.576	78.492	80.513	4.146	4.250	4.360	4.252	0.087	1.998
T-N5	99.419	109.419	119.410	5.383	5.925	6.465	5.924	0.442	6.833
UN5-A-28	80.678	82.731	87.218	4.368	4.480	4.723	4.523	0.148	3.134
UN5-B-28	100.561	108.453	113.480	5.445	5.872	6.145	5.821	0.288	4.685
UN5-C-28	82.673	85.797	86.266	4.476	4.645	4.671	4.597	0.086	1.849
UN3-B-28	93.188	97.075	98.103	5.046	5.256	5.312	5.205	0.115	2.158
UN4-B-28	98.441	99.529	101.507	5.330	5.389	5.496	5.405	0.069	1.249
UN5-BZ-28	76.548	78.394	79.432	4.145	4.245	4.301	4.230	0.065	1.504

相反,文献[22]指出整体试件养护龄期达到 28 d 时界面过渡区的厚度约为 $55 \sim 75 \mu\text{m}$,整体试件缺陷较小,键槽对提高复合试样的劈拉强度贡献相对较小。B 型键槽试件劈拉强度高于 A 型和 C 型,并随着后浇 NC 强度的提高显著增加,可以得出 B 型键槽试件的劈拉强度更为优秀。UN5-BZ-28 与 UN5-B-28 相比,劈裂抗拉强度低 35.3%,说明蒸养条件对黏结抗拉强度有不利影响。

文献[23]指出界面黏结的劈裂抗拉强度与混凝土立方体抗压强度之间存在显著线性关系,因此可以根据混凝土的立方体抗压强度计算界面劈裂抗拉强度。FIB 8 给出根据界面粗糙度值和后浇混凝土的立方体抗压强度来计算界面黏结抗拉强度的公式^[10],如式(3):

$$f_{ctm} = c \cdot f_{ck}^{2/3} \left(0.4 + \frac{0.6\rho_0}{2200} \right) \quad (3)$$

式中: f_{ctm} —混凝土劈裂抗拉强度平均值(MPa); c —拟合参数; f_{ck} —后浇混凝土的立方体抗压强度(MPa); ρ_0 —界面粗糙度值,与键槽密度关系为 $\rho_0 = 100\rho$ 。

通过对表 4 测得劈裂抗拉强度值和立方体抗拉强度进行拟合,如图 11 所示。得出拟合参数 $c =$

1.114 ($R^2 = 0.976$)。

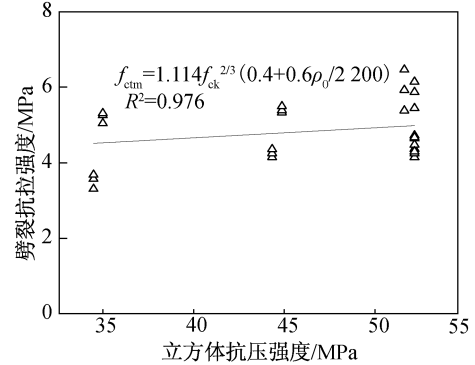


图 11 混凝土立方体抗拉强度与劈裂抗拉强度拟合图

Fig. 11 Fitting diagram of concrete cube tensile strength and splitting tensile strength

3 结论

1) 劈拉试件初始裂纹由加载中心轴线向试件两端水平扩展,形成贯通的 I 字形裂缝。裂缝遇到粗骨料时直接穿过粗骨料并导致其断裂。机械连锁作用是界面劈裂抗拉强度的主要组成部分,键槽增加了 UHPC 和 NC 的接触表面积,一定程度上增加了化学结合力。劈裂拉伸试件界面中心轴线的应变大于两侧的应变,界面裂缝从水平拉应

变开始向压应变区域扩展。由于键槽影响,复合试件的裂缝在混凝土内部由一端延伸至另一端,不会从两端向内扩展。

2) 键槽密度为 0.04 的黏结试件的劈拉强度表现优异。随着后浇混凝土的抗压强度提高,界面的劈拉强度增幅降低。蒸养试件的劈拉强度比标准养护低 35.3%,表明蒸汽养护对黏结抗拉强度有不利影响。复合试件界面劈拉强度可以通过混凝土立方体抗压强度和拟合参数 c 计算得出。

参考文献:

- [1] SHI C, WU Z, XIAO J, et al. A Review on Ultra High Performance Concrete; Part I. Raw Materials and Mixture Design[J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 101:741-751.
- [2] 安新正,王李鑫,蒋毓晋,等. 变形钢筋与再生混凝土粘结性能试验研究[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2022, 39(1):60-64+83.
- [3] SAUCIER F J, BASTIEN J, PIGEON M, et al. A Combined Shear-Compression Device to Measure Concrete-to-Concrete Bonding[J]. *Experimental Techniques*, 1991, 15: 50-55.
- [4] FENG S, XIAO H, MA M Y, et al. Experimental Study on Bonding Behavior of Interface Between UHPC and Concrete Substrate[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 311:125360.
- [5] FENG S, XIAO H, LI Y. Influence of Interfacial Parameters and Testing Methods on UHPC-NSC Bond Strength: Slant Shear vs. Direct Tensile Testing[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 131:104568.
- [6] TAYEH B A, ABU BAKAR B H, MEGAT JOHARI M A, et al. Microstructural Analysis of the Adhesion Mechanism Between Old Concrete Substrate and UHPFC[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, 28:1846-1864.
- [7] GANESH P, RAMACHANDRA MURTHY A S. Simulation of Surface Preparations to Predict the Bond Behaviour Between Normal Strength Concrete and Ultra-High Performance Concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 250:118871.
- [8] AL-OSTA M A, AHMAD S, AL-MADANI M K, et al. Performance of Bond Strength Between Ultra-High-Performance Concrete and Concrete Substrates (Concrete Screed and Self-Compacted Concrete): An Experimental Study [J]. *Journal of Building Engineering*, 2022(51):104291.
- [9] BEUSHAUSEN H. The Influence of Concrete Substrate Preparation on Overlay Bond Strength[J]. *Magazine of Concrete Research*, 2010, 62:845-852.
- [10] HUANG H, YUAN Y, ZHANG W, et al. Bond Behavior Between Lightweight Aggregate Concrete and Normal Weight Concrete Based on Splitting-Tensile Test [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 209:306-314.
- [11] AALETI S, SRITHARAN S. Quantifying Bonding Characteristics Between UHPC and Normal-Strength Concrete for Bridge Deck Application[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2019, 24(6):04019041.
- [12] VALIKHANI A, JANROMI A J, MANTAWY I M, et al. Experimental Evaluation of Concrete-to-UHPC Bond Strength with Correlation to Surface Roughness for Repair Application [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 238:117753.
- [13] BENTZ D P, DE LA VARGA I, MUNOZ J F, et al. Influence of Substrate Moisture State and Roughness on Interface Microstructure and Bond Strength: Slant Shear vs. Pull-off Testing[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2018, 87:63-72.
- [14] DENNEMAN E, KEARSLEY E P, VISSER A T. Splitting Tensile Test for Fiber Reinforced Concrete [J]. *Materials and Structures*, 2011, 44:1441-1449.
- [15] HUSSEIN H H, WALSH K K, SARGAND S, et al. Interfacial Properties of Ultrahigh-Performance Concrete and High-Strength Concrete Bridge Connections[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2016, 28:04015208.
- [16] HUSSEIN L, AMLEH L. Structural Behavior of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete-Normal Strength Concrete or High Strength Concrete Composite Members [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 93:1105-1116.
- [17] 蒋毓晋,安新正,王李鑫,等. 钢纤维再生混凝土劈拉和弯拉强度试验研究[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2022, 39(03):1-6.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 50081—2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [19] 付毓,马东翼,王耀. 橡胶混凝土受压破坏机理的余能基面力元分析[J]. *河北工程大学学报:自然科学版*, 2022, 39(2):45-51.
- [20] 王德弘,沈彤,鞠彦忠,等. 后浇普通混凝土与预制 UHPC 的黏结受剪性能研究[J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(S2):411-419.
- [21] 黄勇,史才军,欧阳雪,等. 混凝土劈裂拉伸测试方法及性能研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(1):1131-1140.
- [22] DE LA VARGA I, MUNOZ J F, BENTZ D P, et al. Grout-Concrete Interface Bond Performance: Effect of Interface Moisture on the Tensile Bond Strength and Grout Microstructure[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 170:747-756.
- [23] TU Y, YU H F, MA H Y, et al. Experimental Study of The Relationship Between Bond Strength of Aggregates Interface and Microhardness of ITZ in Concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 352:128990.

(责任编辑 王利君)